

T S1/5/1

1/5/1

DIALOG(R) File 351:Derwent WPI  
(c) 2004 Thomson Derwent. All rts. reserv.

012843637 \*\*Image available\*\*  
WPI Acc No: 2000-015469/200002  
XRPX Acc No: N00-012183

**Catadioptric projection objective lens for microlithography**  
Patent Assignee: ZEISS FA CARL (ZEIS ); ZEISS CARL (ZEIS ); ZEISS STIFTUNG CARL (ZEIS ); ZEISS STIFTUNG T/A CARL ZEISS (ZEIS )  
Inventor: GERHARD M; RICHTER G; WAGNER C

Number of Countries: 028 Number of Patents: 005

Patent Family:

Patent No	Kind	Date	Applicat No	Kind	Date	Week
EP 961149	A2	19991201	EP 99109008	A	19990506	200002 B
DE 19824030	A1	19991202	DE 1024030	A	19980529	200003
JP 2000031039	A	20000128	JP 99146916	A	19990526	200017
KR 99088659	A	19991227	KR 9919500	A	19990528	200059
TW 466348	A	20011201	TW 99108138	A	19990518	200252

Priority Applications (No Type Date): DE 1024030 A 19980529

Patent Details:

Patent No	Kind	Lan Pg	Main IPC	Filing Notes
EP 961149	A2	G	8 G02B-017/08	

Designated States (Regional):	
AL	AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT
LI	LT LU LV MC MK NL PT RO SE SI
DE 19824030	A1 G02B-017/08
JP 2000031039	A 6 H01L-021/027
KR 99088659	A G02B-027/00
TW 466348	A G02B-027/00

Abstract (Basic): EP 961149 A2

NOVELTY - The projection objective lens has at least one deformable curved mirror (S2) and cooperating setting elements (41) for adjusting the mirror deformation, to provide image error correction, e.g. under control of a CCD camera acting as a wavefront sensor (42).

DETAILED DESCRIPTION - An INDEPENDENT CLAIM for an operating method for a microlithography projection exposure device is also included.

USE - The projection objective lens is used for microlithography, e.g. for semiconductor wafer manufacture.

ADVANTAGE - The setting elements allow correction of non rotationally symmetrical image errors.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The figure shows a schematic representation of a projection exposure device for microlithography.

Mirror deformation setting elements (41)

Wavefront sensor (42)

Deformable mirror (S2)

pp; 8 DwgNo 1/4

Title Terms: CATADIOPTRIC; PROJECT; OBJECTIVE; LENS

Derwent Class: P81; P82; P84; U11

International Patent Class (Main): G02B-017/08; G02B-027/00; H01L-021/027

International Patent Class (Additional): G02B-013/24; G02B-026/00;

G02B-026/08; G03B-021/28; G03F-007/20

File Segment: EPI; EngPI

?

PAGE BLANK (USPTO)



(19)

Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 961 149 A2

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
01.12.1999 Patentblatt 1999/48(51) Int. Cl.<sup>6</sup>: G02B 17/08, G03F 7/20,  
G02B 27/00

(21) Anmeldenummer: 99109008.5

(22) Anmeldetag: 06.05.1999

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
MC NL PT SE  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
AL LT LV MK RO SI

• CARL-ZEISS-STIFTUNG, trading as CARL ZEISS  
89518 Heidenheim (DE)  
Benannte Vertragsstaaten:  
GB IE

(30) Priorität: 29.05.1998 DE 19824030

(72) Erfinder:

- Wagner, Christian, Dr.  
73430 Aalen (DE)
- Gerhard, Michael, Dr.  
73432 Aalen (DE)
- Richter, Gerald  
73453 Abtsgmünd (DE)

(71) Anmelder:

- Carl Zeiss  
89518 Heidenheim (Brenz) (DE)
- Benannte Vertragsstaaten:  
DE FR IT NL

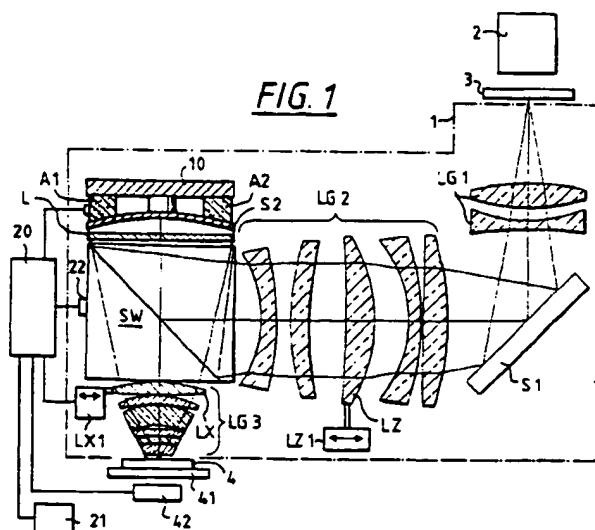
## (54) Katadioptrisches Projektionsobjektiv mit adaptivem Spiegel und Projektionsbelichtungsverfahren

(57) Katadioptrisches Projektionsobjektiv der Mikrolithographie mit mindestens einem gekrümmten Spiegel (S2), wobei

verformbaren Spiegel (S2) verformen können  
die Stellelemente (A1, 41) an bestimmte Bildfehler und deren Korrektur angepaßt sind.

- mindestens ein gekrümmter Spiegel (S2) verformbar ist
- Stellelemente (A1, 41) vorgesehen sind, welche den

Geeignet für Astigmatismus, Vierweiligkeit bedingt durch Lens Heating, Compaction u.a..



EP 0 961 149 A2

**Beschreibung**

[0001] Die Erfindung betrifft ein katadioptrisches Projektionsobjektiv der Mikrolithographie mit mindestens einem gekrümmten Spiegel und ein Betriebsverfahren für ein solches Objektiv.

[0002] Die US 5.142.132 beschreibt einen Wafer-Stepper mit gattungsgemäßem Objektiv und einem Planspiegel, der zur Korrektur optischer Fehler durch ein x/y-Array von Aktuatoren deformiert werden kann. Eine möglichst große Zahl von Aktuatoren für jeweils einen möglichst kleinen Teil des Spiegels wird als vorteilhaft beschrieben. Der verstellbare Spiegel wird unter großem Reflexwinkel betrieben, so daß seine Wirkungen stark asymmetrisch sind.

[0003] Projektionsobjektive der Mikrolithographie mit lageveränderlichen Elementen (z-Trieb) oder Veränderung des optischen Weges durch Änderung von Druck oder Zusammensetzung des Füllgases sind in verschiedenen Varianten mit vielerlei Regelkreisen bekannt. Hier sind allerdings regelmäßig reine refraktive Objektive beschrieben.

[0004] EP 0 660 169 A1 gibt ein refraktives Projektionsobjektiv der Mikrolithographie mit Korrektur nicht rotationssymmetrischer Fehler durch Rotation von zylindrischen Linsen an. Auch sind Zitate zu längsverschiebblichen Linsen angegeben.

[0005] Katadioptrische Projektionsobjektive mit einem gekrümmten Spiegel und Polarisationsstrahleiter sind z.B. aus DE 196 16 922.4 und den darin angegebenen Zitaten bekannt. Der Inhalt jener Patentanmeldung soll auch Teil dieser Anmeldung sein.

[0006] Andere katadioptrische Projektionsobjektive sind ebenfalls bekannt, z.B. solche vom Typ des abgewandelten Schupman-Achromaten, auch H-Design genannt und z.B. in US 5.052.763 beschrieben.

[0007] Aufgabe der Erfindung ist die Bereitstellung eines katadioptrischen Reduktionsobjektivs, das bei möglichst einfacher Konstruktion doch eine effektive Steuerung und Regelung der Abbildungsqualität besonders hinsichtlich veränderlicher Störungen erlaubt. Entsprechende Betriebsverfahren für eine Projektionsbelichtungsanlage sollen angegeben werden.

[0008] Gelöst wird diese Aufgabe durch ein katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch 1. Eine Variante gibt Anspruch 15. Vorteilhafte Ausführungsformen sind Gegenstand der Unteransprüche 2 bis 14 und 16 bis 19.

[0009] Gemeinsam ist allen Ausführungen die Verstellung eines gekrümmten, also schon in der Grundstellung für die Bildgebung wirksamen Spiegels, mit wenigen Aktuatoren, die passend zur erforderlichen Deformation des Spiegels angeordnet sind.

[0010] Die Teilezahl und der Montage- und Steuerungsaufwand wird so erheblich reduziert und die benötigten Formkorrekturen können formtreuer eingestellt werden als mit einem unspezifischen Aktuator-Array.

5 [0011] Das Betriebsverfahren nach Anspruch 20 löst die Aufgabe, ein entsprechendes verfahren anzugeben und konkretisiert höchstens acht Angriffspunkte der Verstelleinrichtung.

10 [0012] Anspruch 21 beschreibt die vorzugsweise erfaßten und korrigierten Bildfehler, wobei die Messung während der Belichtung oder alternierend dazu im Bereich der Bildebene vorgesehen ist.

15 [0013] Ergänzend oder alternativ ist die Erfassung der Betriebsparameter der Projektionsbelichtungsanlage oder der Eigenschaften der Maske als Parameter zur Steuerung der Deformation vorgesehen. Schon bei der Konstruktion oder bei der Kalibrierung des Systems können dafür die zugehörigen Formeinstellungen festgelegt werden.

20 [0014] Ferner können nach den Ansprüchen 23 bis 24 Linsen, Maske und/oder Wafer zur Verbesserung der Abbildungsqualität verschoben werden

25 [0015] Primär betrifft die Erfindung also die Korrektur von Fehlern, die nicht rotationssymmetrisch' aber auch nicht beliebig verteilt sind, durch eine entsprechende nicht rotationssymmetrische Spiegelverformung. Gerade bei Wafer-Scannern mit schmalem rechteckigem Bildfeld ist dies zur Korrektur der entstehenden nicht rotationssymmetrischen Linsendeformationen angezeigt.

30 [0016] Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnung.

35 Figur 1 zeigt schematisch eine Projektionsbelichtungsanlage mit katadioptrischem Reduktionsobjektiv und adaptivem Spiegel;

Figur 2 zeigt ein Schema der Aktuatoren am Spiegel;

Figur 3 zeigt schematisch das Bildfeld eines Wafer-Scanners;

40 Figur 4 zeigt schematisch im Querschnitt einen adaptiven Spiegel mit Aktuator, Stellglied und mehreren Angriffspunkten.

45 [0017] Kernstück der katadioptrischen Projektionsbelichtungsanlage nach Figur 1 ist das katadioptrische Reduktionsobjektiv 1, in dem gezeigten Beispiel die Ausführung nach Figur 1 und Tabelle 1 der Patentanmeldung DE 196 16 922.4 (US Ser. 08/845,384), die hierin inkorporiert sein soll.

50 [0018] Dieses katadioptrische Reduktionsobjektiv 1 umfaßt eine erste Linsengruppe LG1, einen planen Umlenkspiegel S1, eine zweite Linsengruppe LG2, einen Strahlteilerwürfel SW, eine Lambda-Viertel-Platte L, einen gekrümmten Spiegel S2 und eine dritte Linsengruppe LG3. Eine Beleuchtungseinrichtung 2, die Maske 3 und der Wafer 4 auf einem Halter (Waferchuck) 41 vervollständigen die insoweit konventionelle Projektionsbelichtungsanlage.

[0019] Neu ist der Hohlspiegel S2 als adaptiver Spiegel ausgebildet. Dazu sind Aktuatoren A1, A2 und ein Gestell 10 vorgesehen. Ein Sensor 42, z.B. ein Wellenfrontsensor, ist im Bereich des Wafers 4 vorgesehen, der während der Waferbelichtung oder in Pausen, wenn der Wafer 4 aus dem Strahlengang entnommen ist, ein Maß für die Abbildungsqualität mißt.

[0020] Eine Regeleinheit 20 - vorzugsweise eine funktionelle Einheit eines Rechners, der auch weitere Steuer- und Regelaufgaben des Wafer-Steppers oder -Scanners übernimmt - nutzt dessen Signale sowie ggf. die von weiteren Sensoren 21 - z.B. für Luftdruck und Umgebungstemperatur - oder 22 - für die Temperatur des Strahleiterprismas SW - zur Ansteuerung der Aktuatoren A1, A2 und so zur Regelung der Abbildungsqualität.

[0021] Optional können auch achsial verstellbare Linsen - hier die Linse LZ der zweiten Linsengruppe LG2 - und/oder radial verstellbare Linsen - hier die Linse LY - vorgesehen werden und über Stellglieder LZ1, LY1 von der Regeleinheit 20 gesteuert werden.

[0022] Durch Verwendung von immer kürzeren Wellenlängen in der Halbleiterlithographie kommt es zu verschiedenen zeitabhängigen Material-Effekten, die die Abbildungsqualität der Belichtungsoptik empfindlich beeinflussen. Hier ist aufgrund der verstärkten Absorption die Aufheizung von Linsengruppen (Lens heating) zu nennen, deren Auswirkung so stark ist, daß die entstehenden Bildfehler samt ihrem zeitverlauf vermessen, bzw. simuliert und dann mit einer Regelschleife abgestimmt werden müssen. Für Wellenlängen unterhalb 248 nm zeigt sich, daß die Absorption in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke und -dauer zunimmt. Die Absorptionszunahme (Induced Absorption) führt zu einem zusätzlichen Lens heating, das wie oben abgestimmt werden muß. Ein weiterer Effekt ist eine kontinuierliche Zunahme der Brechzahl, die mit einer Schrumpfung des Materials einhergeht. Auch dieser Effekt ist strahlungsabhängig und wird Compaction genannt. Auch hier besteht die Anforderung einer dynamischen, aufgrund der langen Zeitskalen jedoch quasistatischen Korrektur der Bildfehler. Besonders große Bildfehler treten durch Lens heating an einem katadioptrischen Design auf, das einen Strahleiterwürfel SW enthält. Hier ist nach derzeitigem Stand der Materialeigenschaften eine aktive Korrektur von Pupillenfehlern erforderlich.

[0023] Vorgeschlagen wird daher ein adaptiver Spiegel L, der mit geeigneten Manipulationsmöglichkeiten A1, A2 ausgestattet ist, um diese Bildfehler, die material- und prozeßbedingt sind, während des Betriebs des Objektivs 1 abzustimmen und so die Abbildungsqualität des Objektivs 1 zu gewährleisten. Der adaptive Spiegel S2 ist notwendig, um bestimmte Bildfehler, wie Astigmatismus auf der Achse, abzustimmen, wenn ansonsten nur sphärische zentrierte Elemente verwendet werden.

[0024] Dieser Vorschlag ist für alle katadioptrischen

Designs, die einen bildgebenden Spiegel enthalten, verallgemeinerbar. Für alle diese Systeme, insbesondere bei Verwendung eines schlitzförmigen Bildfelds (Scanner) ist die Erwärmung der Objektive nicht rotationssymmetrisch, so daß auf der Achse ein Astigmatismus entsteht.

[0025] Insgesamt sind die Hauptbildfehler, die durch Linsenerwärmung (Lens heating) auch in Folge "induzierter" Absorption und durch Compaction des Strahleiterwürfels entstehen (typische Werte in Klammer):

- a1) Astigmatismus auf der Achse (150 nm)
- b1) Koma auf der Achse (20 nm)
- c1) veränderte Fokuslage (1 µm)
- d1) Bildfeldversatz (quer) (100 nm)
- e1) Maßstabsfehler (1-5 ppm)
- f1) Bildschale (50 nm)
- g1) Vierwelligkeit als Pupillenfehler
- h1) Sphärische Aberration als Pupillenfehler.

[0026] Diese Fehler erreichen den stationären Zustand im Laufe von mehreren Stunden, müssen somit relativ langsam nachgestellt werden.

[0027] Da es sich um ein Scanner-System handelt, ist das Bildfeld schlitzförmig (z.B. 8 x 25 mm). Daher treten stark elliptische Beleuchtungsverteilungen in den Linsen auf (insbesondere bei den wafernahen Linsen der Linsengruppe LG3), die folgende Bildfehler zur Folge haben:

- a2) Astigmatismus auf der Achse
- c2) Veränderte Fokuslage (0,5 µm)
- e2) Maßstabsfehler (1-5 ppm)
- f2) Bildschale (100 nm).

[0028] Die für ein Beamsplittersystem benötigte Lambda-Viertel-Platte steht im 45° Winkel zu den Achsen des Scannerschlitzes. Durch die Halterung der rechteckigen Lambda-Viertel-Platte bedingt, wird aufgrund der Druchbiegung der Platte auch Astigmatismus in 45° Richtung auftreten.

a3) 45° Astigmatismus

[0029] Kompressionsmöglichkeiten sind:

[0029] Für a1), g1), a2), a3) : Adaptiver Spiegel, dieser müßte für a1), a2) und a3) mit mindestens vier Aktuatoren Ai ausgestattet sein (0° und 45° Astigmatismus). Korrigiert man nur den dominanten 0° Astigmatismus, so genügen zwei Aktuatoren Ai. Die Aktuatoren Ai sind paarweise symmetrisch zur optischen Achse anzutragen.

55 g1) braucht, da es sich wegen der Würfelgeometrie nur um eine 0°-Vierwelligkeit handelt, 4 Aktuatoren Ai in vierzähliger Rotations-

	symmetrie zur optischen Achse, mit kollektiver Ansteuerung. Stellbereich der Aktuatoren: -50 nm bis +50 nm Auflösung und Stabilität: < 1 nm	5	Krafteinleitung - den konkaven Spiegel S2 in den Zonen C symmetrisch deformiert. Mit nur zwei Armen könnte das Stellglied 410 auch die zwei Zonen B beeinflussen.
b1)	ist mit einer Zentrierlinse (Linse LX in diesem Beispiel) mit radia-ler Beweglichkeit zu kompensie-ren.	10	[0034] Die in Figur 2 ebenfalls gezeigten Zonen A - zusammenfallend mit zwei der Zonen C - dienen zur Korrektur des Astigmatismus unter 0° zur y-Achse. Die zwei Zonen B unter 45° zur y-Achse dienen zur Korrek-tur des 45° geneigten Astigmatismus. Auch hier werden die Aktuatoren Ai paarweise zu den Zonen A bzw. B gestellt und es sind der Figur 3 entsprechende Konstruktionen mit Stellelementen möglich.
c1), d1), c2):	Justage des Waters 4 in achsia-ler Richtung.	15	[0035] Zur Astigmatismuskorrektur ist es auch vorteil-haft, an den Zonen A Druck und an den beiden dazu gekreuzten Zonen C Zug auf die Spiegelmembran aus-zuüben (oder umgekehrt).
e1), h1), e2), f2):	Verschieben des Retikels 3 in achsialer Richtung und z-Mani-pulatoren LZ1 zum Verschieben von einzelnen Linsen LZ oder Linsengruppen in z-Richtung (achsai).	20	[0036] Es können wie gezeigt achsiale Kräfte in Rich-tung der optischen Achse des Spiegels S2 aufgebracht werden, aber auch Kräfte senkrecht dazu - in der Spie-gelebene senkrecht zur optischen Achse -, Zwischen- und Mischformen und Momente. Die Aktuatoren kön-nen auch am Umfang des Spiegels S2 angreifen.

#### Zum Messen der Bildfehler:

[0030] Bildfeldversatz (d1), Maßstab (e1, e2), Fokus-lage (c1, c2), Astigmatismus (a1, a2, a3) und Bildschale (f1, f2) sind im Stepper im Betrieb bestimmbar, z.B. in der in US 5.142.132 angegebenen Weise. Bildfehler höherer Ordnung müssen entweder experimentell vorab bestimmt werden oder simuliert werden (FE-Rechnungen). Dabei ist zu beachten, daß bei Vermes-sung in Prüfinferometern oder mit Wellenfrontsenso-ren hoher Auflösung verschiedene Betriebsmodi des Objektivs (NA,  $\sigma$ , Reticle-Transmission) sich anders ver-halten. Das Verhalten muß dann in spezifischen look-up tables im Speicher der Steuereinheit 20 abgelegt wer-den.

[0031] Figur 2 zeigt schematisch in Aufsicht auf den konkaven Spiegel S2 die Lage der Angriffszenen der Aktuatoren Ai am konkaven Spiegel S2 bei einem der Figur 3 entsprechenden schlitzförmigen Bildfeld BF.

[0032] Die vier Zonen C, in vierzähliger Rotationssymme-trie auf der x- und y-Achse gelegen, sind geeignet, die Vierwelligkeit zu kompensieren. Dazu werden sie kollektiv angesteuert und deformieren den als elasti sche Membran ausgeführten Spiegel S2 mit vier zuein-ander symmetrischen lokalen Extrema. Die genauen Lagen (Radius) der Aktuatoren Ai in den Zonen C, der Verstellweg und die Form der deformierten Fläche, die über deren Elastizität usw. beeinflußt wird, ist dem ein-zelnen Objektiv 1 und der Dimensionierung des Bild-felds BF anzupassen. Im Rahmen der Optik-Design-Rechnungen und mit Finite-Elemente-Rechnungen wird das realisiert.

[0033] Da alle vier Zonen C kollektiv verstellt werden, ist es möglich, gemäß Figur 4 nur einen Aktuator A4 vorzusehen, der über ein symmetrisches brückenförmiges Stellglied 410 - ausgeführt beispielsweise mit Andruckkugeln 411, 412 zur präzisen momentenfreien

- 5 Krafteinleitung - den konkaven Spiegel S2 in den Zonen C symmetrisch deformiert. Mit nur zwei Armen könnte das Stellglied 410 auch die zwei Zonen B beeinflussen.
- 10 [0034] Die in Figur 2 ebenfalls gezeigten Zonen A - zusammenfallend mit zwei der Zonen C - dienen zur Korrektur des Astigmatismus unter 0° zur y-Achse. Die zwei Zonen B unter 45° zur y-Achse dienen zur Korrek-tur des 45° geneigten Astigmatismus. Auch hier werden die Aktuatoren Ai paarweise zu den Zonen A bzw. B gestellt und es sind der Figur 3 entsprechende Konstruktionen mit Stellelementen möglich.
- 15 [0035] Zur Astigmatismuskorrektur ist es auch vorteil-haft, an den Zonen A Druck und an den beiden dazu gekreuzten Zonen C Zug auf die Spiegelmembran aus-zuüben (oder umgekehrt).
- 20 [0036] Es können wie gezeigt achsiale Kräfte in Rich-tung der optischen Achse des Spiegels S2 aufgebracht werden, aber auch Kräfte senkrecht dazu - in der Spie-gelebene senkrecht zur optischen Achse -, Zwischen- und Mischformen und Momente. Die Aktuatoren kön-nen auch am Umfang des Spiegels S2 angreifen.
- 25 [0037] Die erforderliche Lösung zeigt also besondere Einfachheit, da mit wenigen unabhängigen Aktuatoren gezielt bestimmte wenige optische Fehler beeinflußt werden. Dabei ist an eine echte Regelung gedacht, wie auch an reine Feedforward-Steuerung. Auch ist an die Überkompensation an einem verstellbarem Element gedacht, um Fehlereinflüsse anderer Elemente - irgendwo in der Projektionsbelichtungsanlage - vorzu-halten. Fertigungstoleranzen (Exemplarstreuung), Lens Heating und Compaction, aber auch Brechungsindex-änderungen des Füllgases u.a. können kompensiert werden. Zur Reduzierung der Stellwege kann im akti-ven Spiegel oder in anderen Teilen des Systems ein Vorhalt vorgesehen werden.
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55
- Patentansprüche**
1. Katadioptrisches Projektionsobjektiv der Mikrolitho-graphie mit mindestens einem gekrümmten Spiegel (S2), dadurch gekennzeichnet, daß
    - mindestens ein gekrümmter Spiegel (S2) ver-formbar ist
    - Stellelemente (Ai, 41) vorgesehen sind, welche den verformbaren Spiegel (S2) verformen kön-nen
    - die Stellelemente (Ai, 41) an bestimmte Bild-fehler und deren Korrektur angepaßt sind.
  2. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß genau ein gekrümmter Spiegel (S2) vorhanden ist.
  3. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß ein Stellelement (41) mit einem Aktuator (A4) und zwei Anschlußstiften (B) am verstellbaren Spiegel

- (S2) vorgesehen ist, bei dem die zwei Anschlußstellen (B) symmetrisch zur optischen Achse des Spiegels (S2) angeordnet sind, und mit dem der Astigmatismus korrigiert wird.
4. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-2 oder Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß ein zweites Stellelement mit einem zweiten Aktuator und vier Anschlußstellen (C) am verstellbaren Spiegel (S2) vorgesehen ist, bei dem die vier Anschlußstellen (C) in vierzähliger Symmetrie zur optischen Achse des Spiegels (S2) angeordnet sind.
5. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-4, dadurch gekennzeichnet, daß
- mindestens ein Sensor (42) vorgesehen ist, der von dem projizierten Bild beeinflußt wird, und
  - ein Steuersystem (20), welches den mindestens einen Sensor (42) und die Stellelemente (Ai) zu einem Regelkreis verknüpft, in dem Bildfehler minimiert werden.
6. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-5, dadurch gekennzeichnet, daß
- mindestens ein zweiter Sensor (21, 22) vorgesehen ist, und
  - ein Steuersystem (20), welches mindestens einen zweiten Sensor (21, 22) und die Stellelemente (Ai, 410) zu einem Regelkreis verknüpft, in dem Bildfehler minimiert werden.
7. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (42) ein Wellenfrontsensor ist.
8. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (42) eine Kamera, insbesondere eine CCD-Kamera ist.
9. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-8, dadurch gekennzeichnet, daß ein Sensor (21, 22) Zeit, Temperatur, Druck, eine Strahlungsgröße, oder die Zahl der Lichtpulse oder der Belichtungen erfäßt.
10. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-9, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich mindestens ein optisches Element (LZ, LX) lageveränderlich ist.
11. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach
- 5      12. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Lage achsial in Richtung der optischen Achse veränderlich ist oder der optische Weg variabel ist.
- 10     13. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 10-12, dadurch gekennzeichnet, daß die Lage rotatorisch um die optische Achse veränderlich ist.
- 15     14. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-13, dadurch gekennzeichnet, daß ein oder mehrere Stellelemente (Ai, 42) einen oder mehrere Aktuatoren (Ai) aufweisen, deren Form und Anordnung an die Form der Deformation des Spiegels (S2) angepaßt sind.
- 20     15. Katadioptrisches Projektionsobjektiv der Mikrolithographie mit mindestens einem gekrümmten Spiegel (S2), dadurch gekennzeichnet, daß
- mindestens ein gekrümmter Spiegel (S2) verformbar ist,
  - die Verformbarkeit Formen des Spiegels (S2) umfaßt mit zwei- oder vierzähliger Rotationssymmetrie oder mit Rotationssymmetrie oder Überlagerungen von Formen mit den genannten Symmetrien,
  - Aktuatoren (Ai) oder durch Aktuatoren (Ai) betätigte Stellelemente (410) vorgesehen sind zur Verformung, deren Zahl, Form und Lage der Krafteinleitung zur Verformung des Spiegels (S2) den Formen des Spiegels (S2) und deren Symmetrie angepaßt ist.
- 25     16. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-15, dadurch gekennzeichnet, daß der Spiegel (S2) in seiner Grundform rotationssymmetrisch ist und einen mit dem Radius monoton wachsenden Gradienten in radialer Richtung aufweist.
- 30     17. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch 15 oder Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß vier Aktuatoren (A1-A4) oder Angriffspunkte von Stellelementen (410) vorgesehen sind, welche der Grundform eine Vierwelligkeit mit vierzähliger Rotationssymmetrie zur optischen Achse überlagern können.
- 35     18. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-16, dadurch gekennzeichnet, daß sechs Stellen vorhanden sind, an denen ein Aktuator (Ai) oder ein Stellelement (410)
- 40     45     50     55

an den Spiegel (S2) angreift, wovon vier (C) in vierzähleriger Symmetri angeordnet sind und paarweise synchronisiert sind und die restlichen zwei (B) in zweizähleriger Symmetrie auf einer Winkelhalbierenden zwischen den vier Aktuatoren (A1-A4) oder Stellelementen angeordnet sind. 5

destens einem der Ansprüche 1-19 für ein Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 20-25.

19. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-18, dadurch gekennzeichnet, daß Aktuatoren (Ai) oder durch 10 Aktuatoren (Ai) betätigte Stellelemente (410) in Richtung der optischen Achse des Spiegels (S2) oder senkrecht dazu wirken.
20. Die Abbildungsqualität steigerndes Betriebsverfahren einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einem katadioptrischen Projektionsobjektiv (1) mit mindestens einem gekrümmten Spiegel (S2) bei dem ein gekrümmter Spiegel (S2) deformiert wird durch Aktuatoren (Ai) oder Stellglieder (410) mit höchstens vier, vorzugsweise drei Paar Angriffspunkten (A, B, C). 15 20
21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß während der Belichtung oder alternierend damit im Bereich der Bildebene (4) Bildfeldversatz, Maßstab, Fokuslage, Astigmatismus und/oder Bildschale erfaßt werden und die Aktuatoren (Ai) oder Stellglieder (410) abhängig davon angesteuert werden. 25 30
22. Verfahren nach Anspruch 20 oder Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß Betriebsparameter der Projektionsbelichtungsanlage, besonders die numerische Apertur des Projektionsobjektivs (1), Art und Kohärenzgrad der Beleuchtung (2), und/oder Eigenschaften der Maske (3), insbesondere deren mittlere Transmission, erfaßt werden und die Aktuatoren (Ai) oder Stellglieder (410) abhängig davon angesteuert werden. 35 40
23. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 20-22, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich mindestens eine Linse (LZ, LY) bewegt wird, insbesondere entlang der optischen Achse verschoben, um diese gedreht oder senkrecht dazu verschoben wird. 45
24. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 20-23, dadurch gekennzeichnet, daß die Maske (3) oder der Wafer (4) in ihrer Lage verändert werden. 50
25. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 20-24, dadurch gekennzeichnet, daß Lens Heating und/oder Compaction, vorzugsweise zugleich, 55 kompensiert werden.
26. Verwendung eines Projektionsobjektivs nach min-

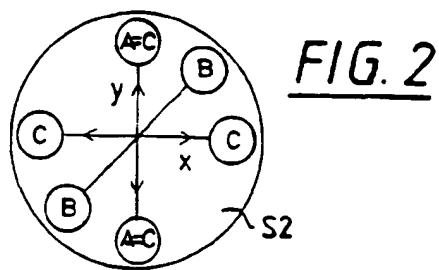


FIG. 2

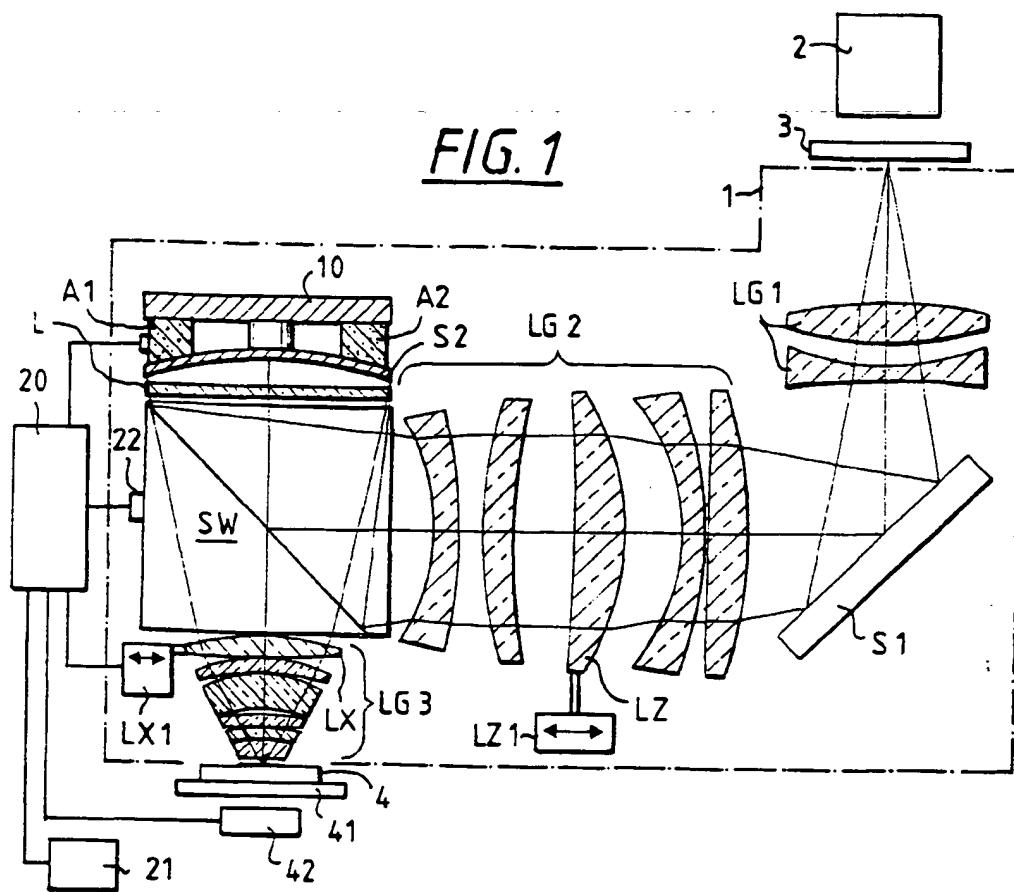


FIG. 1

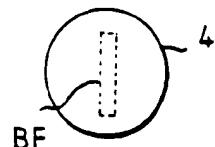
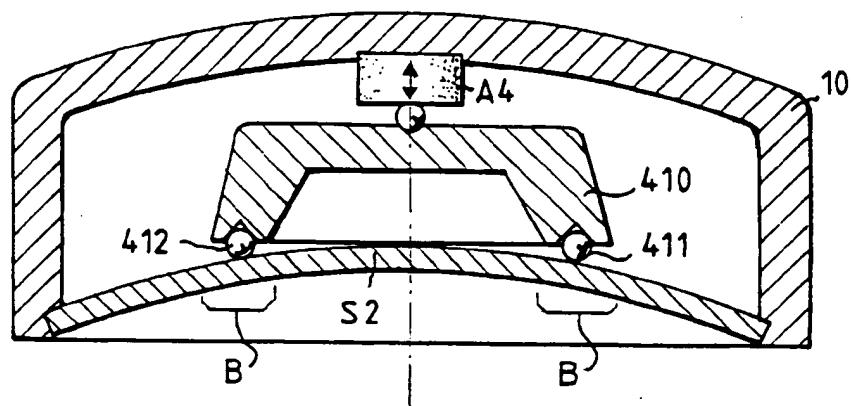


FIG. 3

FIG. 4





(19)

Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 961 149 A3

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(88) Veröffentlichungstag A3:  
10.05.2000 Patentblatt 2000/19(51) Int. Cl.<sup>7</sup>: G02B 17/08, G03F 7/20,  
G02B 27/00(43) Veröffentlichungstag A2:  
01.12.1999 Patentblatt 1999/48

(21) Anmeldenummer: 99109008.5

(22) Anmeldetag: 06.05.1999

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
 AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
 MC NL PT SE

Benannte Erstreckungsstaaten:  
 AL LT LV MK RO SI

(30) Priorität: 29.05.1998 DE 19824030

(71) Anmelder:  
 • Carl Zeiss  
 89518 Heidenheim (Brenz) (DE)

Benannte Vertragsstaaten:  
 DE FR IT NL

• CARL-ZEISS-STIFTUNG, trading as CARL ZEISS  
 89518 Heidenheim (DE)  
 Benannte Vertragsstaaten:  
 GB IE

(72) Erfinder:

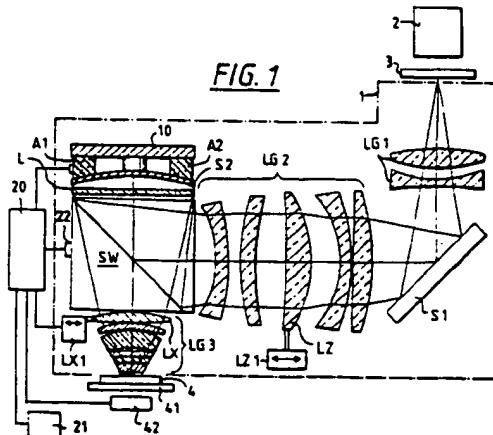
- Wagner, Christian, Dr.  
 73430 Aalen (DE)
- Gerhard, Michael, Dr.  
 73432 Aalen (DE)
- Richter, Gerald  
 73453 Abtsgmünd (DE)

(54) Katadioptrisches Projektionsobjektiv mit adaptivem Spiegel und Projektionsbelichtungsverfahren

(57) Katadioptrisches Projektionsobjektiv der Mikrolithographie mit mindestens einem gekrümmten Spiegel (S2), wobei

- mindestens ein gekrümmter Spiegel (S2) verformbar ist
- Stellelemente (Ai, 41) vorgesehen sind, welche den verformbaren Spiegel (S2) verformen können
- die Stellelemente (Ai, 41) an bestimmte Bildfehler und deren Korrektur angepaßt sind.

Geeignet für Astigmatismus, Vierwelligkeit bedingt durch Lens Heating, Compaction u.a..



EP 0 961 149 A3



Europäisches  
Patentamt

## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 99 10 9008

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.6)		
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.6)		
X	EP 0 744 641 A (SVG LITHOGRAPHY SYSTEMS INC) 27. November 1996 (1996-11-27)	1,2,5, 8-12,15, 16,19 20-26	G02B17/08 G03F7/20 G02B27/00		
A	* Seite 5, Zeile 6 - Seite 15, Zeile 7; Abbildungen 1-13 *	---			
D,X	WO 93 22711 A (LITEL INSTR INC) 11. November 1993 (1993-11-11)	1,2,5,7, 14-16 3,4, 17-21, 25,26			
A	* Seite 7, Zeile 13 - Seite 12, Zeile 8; Abbildungen 1,4 *	---			
A	US 4 647 164 A (SAWICKI RICHARD H ET AL) 3. März 1987 (1987-03-03) * Spalte 4, Zeile 5 - Spalte 6, Zeile 37; Abbildungen 4-7 *	1-4, 15-20			
A	US 4 655 563 A (PLANTE ROLAND L ET AL) 7. April 1987 (1987-04-07) * Spalte 3, Zeile 49 - Spalte 4, Zeile 16; Abbildungen 1,2 *	1-4, 15-20			
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1996, no. 06, 28. Juni 1996 (1996-06-28) & JP 08 055789 A (NIKON CORP), 27. Februar 1996 (1996-02-27) * Zusammenfassung; Abbildung 2 * -& US 5 793 473 A (KOYAMA ET AL) 11. August 1998 (1998-08-11) * Spalte 6, Zeile 27 - Spalte 8, Zeile 41; Abbildungen 2,3 *	1,15	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.6)		
P,A	---	1,5-9,15	G02B G03F		
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt					
Recherchenort:	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer:			
DEN HAAG	22. März 2000	THEOPISTOU, P			
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE					
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund D : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur					
T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldeatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument					

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 99 10 9008

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.  
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
 Diese Angaben dienen nur zur Orientierung und erfolgen ohne Gewähr.

22-03-2000

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
EP 0744641 A	27-11-1996	US	5684566 A	04-11-1997
		CA	2177200 A	25-11-1996
		JP	9006011 A	10-01-1997
WO 9322711 A	11-11-1993	US	5142132 A	25-08-1992
US 4647164 A	03-03-1987	KEINE		
US 4655563 A	07-04-1987	KEINE		
JP 08055789 A	27-02-1996	US	5793473 A	11-08-1998

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

(19) European Patent Office

(11) EP 0 961 149 A2

(12) EUROPEAN PATENT APPLICATION

(43) Date of publication:  
12/01/99 Pat. nt Gaz. tt 1999/48

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>: G02B 17/08, G03F 7/20,  
G02B 27/00

(21) Application number: 99109008.5

(22) Application date: 05/06/99

(84) Convention states named:  
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT  
LI LU MC NL PT SE**  
Extension states named:  
**AL LT LV MK RO SI**

**CARL-ZEISS-STIFTUNG, trading as CARL  
ZEISS**  
**89518 Heldenheim (DE)**  
Convention states named:  
**GB IE**

(30) Priority: 05/29/98 DE 19824030

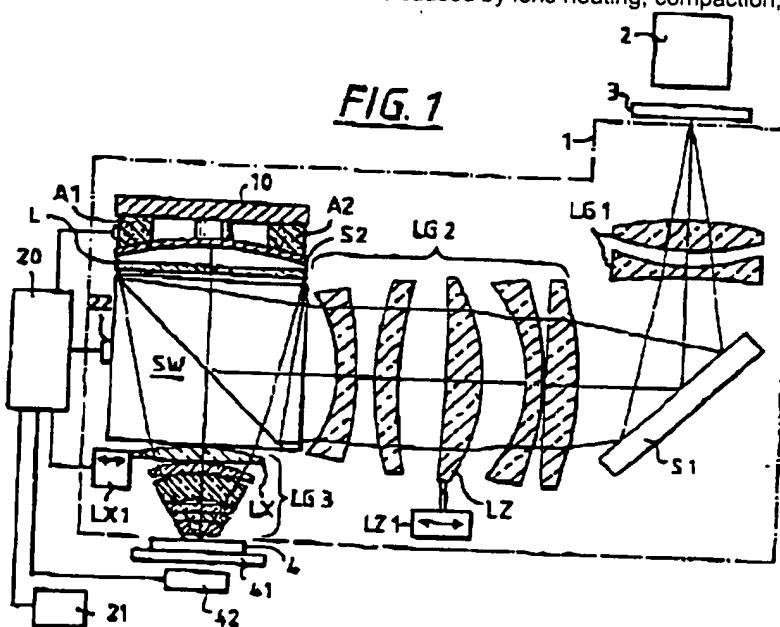
(72) Inventor:  
**Wagner, Christian, Dr.**  
**73430 Aalen (DE)**  
**Gerhard, Michael, Dr.**  
**73432 Aalen (DE)**  
**Richter, Gerald**  
**73453 Abtsgmund (DE)**

(54) Catadioptric projection objective having adaptive mirror and projection exposure method

(57) A catadioptric projection objective for microlithography having at least one curved mirror (S2), wherein

- at least one curved mirror (S2) is deformable
- final control elements (A1, 41) are provided which may deform the deformable mirror (S2)
- the final control elements (A1, 41) are tailored to specific image defects and their correction.

Suitable for astigmatism, fourth-order waviness caused by lens heating, compaction, etc.



## Description

- [0001] The present invention relates to a catadioptric projection objective for microlithography having at least one curved mirror and an operating method for such an objective.
- [0002] US Patent 5,142,132 describes a wafer stepper having an objective according to the species and a planar mirror which may be deformed by an x/y array of actuators for correction of optical faults. The greatest possible number of actuators for each smallest possible part of the mirror is described as advantageous. The adjustable mirror is operated at a large reflex angle, so that its effects are strongly asymmetric.
- [0003] Projection objectives for microlithography having elements whose position may be changed (z drive) or change of the optical path by changing pressure or composition of the filler gas are known in different variants having manifold control circuits. However, in this case purely refractive objectives are typically described.
- [0004] EP 0 660 169 A1 specifies a refractive projection objective for microlithography using correction of non-rotationally symmetric errors through rotation of cylindrical lenses. Citations for lenses which may be displaced lengthwise are also indicated.
- [0005] Catadioptric projection objectives having a curved mirror and polarization beam splitter are known from DE 196 16 922.4 and the citations indicated therein. The content of that patent application is also to be part of this application.
- [0006] Other catadioptric projection objectives are also known, e.g., those of the type of the altered Schupmann achromatics, also called H-design and described in US Patent 5,052,763, for example.
- [0007] The object of the present invention is the provision of a catadioptric reduction objective which, with the simplest possible construction, still allows effective control and regulation of the imaging quality, especially in regard to changeable interference. Corresponding operating methods for a projection exposure facility are to be specified.
- [0008] This object is achieved by a catadioptric projection objective according to Claim 1. Claim 15 specifies a variation. Advantageous embodiments are the object of subclaims 2 through 14 and 16 through 19.
- [0009] All embodiments share the feature of adjusting a curved mirror, which is therefore already active in the basic setting for imaging, using a few actuators, which are positioned in accordance with the necessary deformation of the mirror.
- [0010] The part count and the assembly and control outlay are thus significantly reduced and the necessary shape corrections may be set with more dimensional accuracy than using an unspecific actuator array.
- [0011] The operating method according to Claim 20 achieves the object of specifying a corresponding method and fixes at most eight attack points of the adjustment device.
- [0012] Claim 21 describes the image faults which are preferably detected and corrected, the measurement being provided during the exposure or, as an alternative to this, in the region of the image plane.
- [0013] As a supplement or alternative, the detection of the operating parameters of the projection exposure facility or the properties of the mask are provided as parameters for controlling the deformation. Even during the construction or the calibration of the system, the associated shape settings may be fixed for this purpose.
- [0014] Furthermore, lenses, masks, and/or wafers may be shifted to improve the imaging quality according to Claims 23 through 24.
- [0015] The present invention thus primarily relates to the correction of errors which are not distributed rotationally symmetrically, but also not arbitrarily, through a corresponding non-rotationally symmetric mirror deformation. Precisely for wafer scanners having a

narrow rectangular image field, this is indicated for correction of the non-rotationally symmetric lens deformations which arise.

[0016] The present invention is described in greater detail on the basis of the drawing.

Figure 1 schematically shows a projection exposure facility having a catadioptric reduction objective and an adaptive mirror;

Figure 2 shows a scheme of the actuators on the mirror;

Figure 3 schematically shows the image field of a wafer scanner;

Figure 4 schematically shows an adaptive mirror having an actuator, final control element, and multiple attack points.

[0017] The core part of the catadioptric projection exposure facility shown in Figure 1 is the catadioptric reduction objective 1, in the example shown, the embodiment according to Figure 1 and Table 1 of patent application DE 196 16 922.4 (US Serial No. 08/845,384), which is to be incorporated herein.

[0018] This catadioptric reduction objective 1 includes a first lens group LG1, a planar deflecting mirror S1, a second lens group LG2, a beam splitter cube SW, a quarter-wave plate L, a curved mirror S2, and a third lens group LG3. An illumination device 2, a mask 3, and the wafer 4 on a holder (wafer chuck) 41 complete the projection exposure facility, which is conventional thus far.

[0019] The concave mirror S2 is implemented as an adaptive mirror in a novel way. For this purpose, actuators A1, A2 and a stand 10 are provided. A sensor 42, e.g., a wavefront sensor, is provided in the region of the wafer 4, which measures a dimension for the imaging quality during the wafer exposure or in pauses when the wafer 4 is removed from the beam path.

[0020] A regulating unit 20 - preferably a functional unit of the computer which also assumes further control and regulation tasks of the wafer stepper or scanner - uses its signals and possibly those of further sensors 21 - e.g., for air pressure and ambient temperature - or 22 - for the temperature of the beam splitter prism SW - for controlling the actuators A1, A2 and thus for regulating the imaging quality.

[0021] Optionally, axially movable lenses, - in this case the lens LZ of the second lens group LG2 - and/or radially movable lenses - in this case the lens LY - may also be provided and controlled by the regulating unit 20 via final control elements LZ1, LY1.

[0022] Through the use of shorter and shorter wavelengths in semiconductor lithography, different time-dependent material effects occur, which sensitively influence the imaging quality of the exposure optic. In this case, because of the amplified absorption, the heating of lens groups (lens heating) is to be cited, whose effect is so strong that the resulting image faults must be measured and/or simulated together with their course over time and then balanced using a control loop. For wavelengths below 248 nm, it has been shown that the absorption increases as a function of the radiation strength and duration. The absorption increase (induced absorption) leads to additional lens heating which must be balanced as above. A further effect is a continuous increase of the index of refraction, which accompanies shrinkage of the material. This effect is also a function of radiation and is referred to as compaction. In this case as well, the requirement exists for a dynamic correction of the image faults, which is, however, quasi-static because of the long time scales. Especially large image faults occur through lens heating on a catadioptric design which contains a beam splitter cube SW. In this

case, active correction of pupil errors is necessary according to the current state of material properties.

[0023] Therefore, an adaptive mirror L is suggested which is equipped with suitable manipulation possibilities A1, A2 in order to balance these image faults, which are dependent on the material and process, during the operation of the objective 1, and thus to ensure the imaging quality of the objective 1. The adaptive mirror S2 is necessary in order to balance specific image faults, such as astigmatism on the axis, if otherwise only spherically centered elements are used.

[0024] This suggestion may be generalized for all catadioptric designs which contain an imaging mirror. For all of these systems, particularly if a slotted image field (scanner) is used, the heating of the objective is not rotationally symmetric, so that an astigmatism arises on the axis.

[0025] Overall, the main image faults which arise through lens heating, also as a consequence of "induced" absorption and through compaction of the beam splitter cube (typical values in parentheses), are as follows:

- a1) Astigmatism on the axis (150 nm)
- b1) Coma on the axis (20 nm)
- c1) altered focal position (1 µm)
- d1) Image field offset (transverse) (100 nm)
- e1) Scale error (1-5 ppm)
- f1) image curvature (50 nm)
- g1) Fourth-order waviness as a pupil error
- h1) Spherical aberration as a pupil error.

[0026] The stationary state reaches these errors over the course of multiple hours, and must therefore be readjusted relatively slowly.

[0027] Since it is a scanner system, the image field is slotted (e.g., 8 x 25 mm). Therefore, strongly elliptical illumination distributions arise in the lenses (particularly for the wafer-like lenses of the lens group LG3), which result in the following image faults:

- a2) Astigmatism on the axis
- c2) Altered focal position (0.5 µm)
- e2) Scale error (1-5 ppm)
- f2) Image curvature (100 nm)

[0028] The quarter-wave plate necessary for a beam splitter system is at a 45° angle to the axes of the scanner slot. Because of the holder of the rectangular quarter-wave plate, astigmatism also occurs in the 45° direction due to the sag of the plate.

- a3) 45° astigmatism

Compensation possibilities are as follows:

[0029] For a1), g1), a2), a3): adaptive mirror, this must be equipped with at least four actuators Ai for a1), a2), and a3) (0° and 45° astigmatism). If only the dominant 0° astigmatism is corrected, two actuators Ai are sufficient. The actuators Ai are to be positioned in pairs symmetrically to the optical axis.

- g1) requires, since because of the cubic geometry, it is only a 0° fourth-order waviness, 4 actuators Ai in fourfold rotational

symmetry to the optical axis, with collective control. Adjustment range of the actuators: - 50 nm to + 50 nm resolution and stability: < 1 nm

- b1) is to be compensated with a centering lens (lens LX in this example) having radial mobility.
- c1), d1), c2): adjustment of the wafer 4 in the axial direction.
- e1), h1), e2), f2): shift of the reticle 3 in the axial direction and z manipulators LZ1 for shifting individual lenses LZ or lens groups in the z direction (axial).

For measuring the image faults:

[0030] Image field offset (d1), scale (e1, e2), focus position (c1, c2), astigmatism (a1, a2, a3), and image curvature (f1, f2) may be determined in the stepper during operation, e.g., in the way specified in US Patent 5,142,132. Image faults of higher order must be either experimentally determined beforehand or simulated (FE calculations). It is to be noted in this case that for measurement in test interferometers or using wavefront sensors of higher resolution, different operating modes of the objective (NA,  $\sigma$ , reticle transmission) behave differently. The behavior must then be listed in specific lookup tables in the memory of the control unit 20.

[0031] Figure 2 schematically shows, in an aspect of the concave mirror S2, the position of the attack zones of the actuators Ai on the concave mirror S2 for a slotted image field BF corresponding to Figure 3.

[0032] The four zones C, placed in fourfold rotational symmetry on the x and y axes, are suitable for compensating for the fourth-order waviness. For this purpose, they are control collectively and deform the mirror S2, implemented as an elastic membrane, using four local extremes which are symmetrical to one another. The precise positions (radius) of the actuators Ai in the zones C, the adjustment path, and the shape of the deformed surface, which is influenced via its elasticity, etc., is to be tailored to the individual objective 1 and the dimensioning of the image field BF. This is implemented in the scope of the optic design calculations and using finite element calculations.

[0033] Since all four zones C are adjusted collectively, it is possible as shown in Figure 4 to provide only one actuator A4, which, via a symmetrical bridge-shaped final control element 410 - implemented using pressure spheres 411, 412, for example, for precise moment-free force introduction - symmetrically deforms the concave mirror S2 in the zones C. Using only two arms, the final control element 410 may also influence the two zones B.

[0034] The zones A also shown in Figure 2 - coincident with two of the zones C - are used for correcting the astigmatism at 0° to the y-axis. The two zones B at 45° to the y-axis are used for correcting the astigmatism slanted at 45°. In this case as well, the actuators Ai are placed in pairs to the zones A and/or B and constructions using final control elements corresponding to Figure 3 are possible.

[0035] For astigmatism correction, it is also advantageous to exert pressure on the zones A and traction on the mirror membrane at the two intersecting zones C (or vice versa).

[0036] As shown, axial forces may be applied in the direction of the optical axis of the mirror S2, but forces perpendicular thereto - perpendicular to the optical axis in the

mirror plane - intermediate and mixed forms and moments may also be applied. The actuators may also attack on the circumference of the mirror S2.

[0037] The achievement of the object according to the present invention thus shows special simplicity, since using few independent actuators, a few specific optical faults may be influenced in a targeted way. In this case, actual regulation is considered, as well as pure feed-forward control. Overcompensation on an adjustable element is also considered in order to provide error influence of other elements - somewhere in the projection exposure facility. Manufacturing tolerances (exemplary scattering), lens heating and compaction, but also index of refraction changes of the filler gas and other things may be compensated for. To reduce the adjustment paths, a reserve may be provided in the active mirror or in other parts of the system.

### Patent Claims

#### What is claimed is:

1. A catadioptric projection objective for microlithography having at least one curved mirror (S2), characterized in that
  - at least one curved mirror (S2) is deformable
  - final control elements (Ai, 41) are provided which may deform the deformable mirror (S2)
  - the final control elements (Ai, 41) are tailored to specific image faults and their correction.
2. The catadioptric projection objective according to Claim 1, characterized in that precisely one curved mirror (S2) is provided.
3. The catadioptric projection objective according to Claim 1 or 2, characterized in that a final control element (41) is provided having an actuator (A4) and two connection points (B) on the adjustable mirror (S2), in which the two connection points (B) are positioned symmetrically to the optical axis of the mirror (S2), and using which the astigmatism is corrected.
4. The catadioptric projection objective according to at least one of Claims 1-2 or Claim 3,  
characterized in that a second final control element having a second actuator and four connection points (C) is provided on the adjustable mirror (S2), on which the four connection points (C) are positioned in fourfold symmetry to the optical axis of the mirror (S2).
5. The catadioptric projection objective according to at least one of Claims 1-4, characterized in that
  - at least one sensor (42) is provided which is influenced by the projected image, and
  - a control system (20) is provided, which links the at least one sensor (42) and the final control element (Ai) to a control circuit, in which image faults are minimized.
6. The catadioptric projection objective according to at least one of Claims 1-5, characterized in that

- at least one second sensor (21, 22) is provided, and
  - a control system (20) is provided, which links the at least one second sensor (21, 22) and the final control element (Ai, 410) to a control loop, in which image faults are minimized.
7. The catadioptric projection objective according to Claim 5, characterized in that the sensor (42) is a wave front sensor.
  8. The catadioptric projection objective according to Claim 5, characterized in that the sensor (42) is a camera, particularly a CCD camera.
  9. The catadioptric projection objective according to at least one of Claims 1-8, characterized in that a sensor (21, 22) detects time, temperature, pressure, a radiation variable, or the number of the light pulses or of the exposures.
  10. The catadioptric projection objective according to at least one of Claims 1-9, characterized in that, in addition, at least one optical element (LZ, LX) may change its position.
  11. The catadioptric projection objective according to Claim 10, characterized in that the position is changeable axially in the direction of the optical axis or the optical path is variable.
  12. The catadioptric projection objective according to Claim 10 or Claim 11, characterized in that the position is changeable transversely to the optical axis.
  13. The catadioptric projection objective according to at least one of Claims 10-12; characterized in that the position is changeable rotationally around the optical axis.
  14. The catadioptric projection objective according to at least one of Claims 1-13, characterized in that one or more final control elements (Ai, 42) have one or more actuators (Ai), whose shape and arrangement are tailored to the shape of the deformation of the mirror (S2).
  15. A catadioptric projection objective for microlithography having at least one curved mirror (S2), characterized in that
    - at least one curved mirror (S2) is deformable,
    - the deformability of shapes of the mirror (S2) includes twofold or fourfold rotational symmetry or rotational symmetry or superpositions of shapes having the symmetries cited,
    - actuators (Ai) or final control elements (410) actuated by actuators (Ai) are provided for deformation, whose number, shape and position is tailored to the force introduction for deforming the mirror (S2), the shapes of the mirror (S2), and their symmetry.
  16. The catadioptric projection objective according to at least one of Claims 1-15, characterized in that the basic shape of the mirror (S2) is rotationally symmetric and has a gradient which grows monotonously in the radial direction with the radius.

17. The catadioptric projection objective according to Claim 15 or Claim 16, characterized in that four actuators (A1-A4) or attack points of final control elements (410) are provided, which may superimpose a fourth-order waviness with fourfold rotational symmetry to the optical axis on the basic shape.
18. The catadioptric projection objective according to at least one of Claims 1-16, characterized in that six points are provided at which an actuator (Ai) or a final control element (410) attacks the mirror (S2), four of them (C) being positioned in fourfold symmetry and synchronized in pairs and the remaining two (B) being positioned in twofold symmetry on a median line between the four actuators (A1-A4) or final control elements.
19. The catadioptric projection objective according to at least one of Claims 1-18, characterized in that actuators (Ai) or final control elements (410) actuated by actuators (Ai) act in the direction of the optical axis of the mirror (S2) or perpendicularly thereto.
20. An operating method, which increases the imaging quality, of a microlithography projection exposure facility having a catadioptric projection objective (1) having at least one curved mirror (S2), in which a curved mirror (S2) is deformed by actuators (Ai) or final control elements (410) having at most four, preferably three pairs of attack points (A, B, C).
21. The method according to Claim 20, characterized in that during the exposure or alternating therewith, image field offset, scale, focal position, astigmatism, and/or image curvature are detected in the region of the image plane (4) and the actuators (Ai) or final control elements (410) are controlled as a function thereof.
22. The method according to Claim 20 or Claim 21, characterized in that operating parameters of the projection exposure facility, especially the numerical aperture of the projection objective (1), the type and degree of coherency of the illumination (2), and/or properties of the mask (3), particularly its average transmission, are detected and the actuators (Ai) or final control elements (410) are controlled as a function thereof.
23. The method according to at least one of Claims 20-22, characterized in that in addition, at least one lens (LZ, LY) is moved, particularly shifted along the optical axis, rotated around this axis, or shifted perpendicularly thereto.
24. The method according to at least one of Claims 20-23, characterized in that the position of the mask (3) or the wafer (4) is changed.
25. The method according to at least one of Claims 20-24, characterized in that lens heating and/or compaction are compensated for, preferably simultaneously.
26. A use of a projection objective according to at least one of Claims 1-19 for a method according to at least one of Claims 20-25.